無人ボート搭載型マルチビームソナーによる 洪水時の河床波計測について

橘田 隆史・坂元 賢司・佐々木 智弘 (株式会社ハイドロシステム開発) 萬矢 敦啓・小関 博司 (国立研究開発法人 土木研究所)

1. はじめに

河川では出水規模に応じて川底に様々な河床 形態が現れる。出水規模が中程度以上になる と、河床形態は砂漣(Ripple)から砂堆(Dune) へと遷移し(図1参照)、これら小規模河床波 と呼ばれる凹凸が発達することで流れの抵抗 を増大させ、水位上昇をもたらす¹⁾。また、現 状では出水規模と河床波の定量的な関係を把 握することが困難であるため、河床波の存在は 水位予測を困難にさせる要因となっている。こ れまで、水槽実験などによって河床波と水面波 形、流速鉛直分布、流砂速度、掃流砂、など の関係について多くの報告があるが²⁾³⁾、実河 川においてはこれを計測することが非常に困難 であるため、実態は不明な点が多い。

本報では、洪水流量観測用の無人ボートに、 小型軽量で高性能なマルチビームソナーとドッ プラー式流向流速計(以下、ADCPと記述)



を同時に装着し、国内最大規模の実験水路で ある十勝川千代田実験水路において、準実河 川規模での洪水観測を行った結果を報告する。 なお、本報では砂連と砂堆を合わせて河床波 と表現し、区別する必要がある場合のみ個別 に表現する。

2. マルチビームソナーの現状

近年におけるマルチビームソナーの技術革新 は目覚ましく、Teledyne RESON では、2013 年以降、設計製造を根本から刷新した SeaBat T シリーズ (T20-P、T50-P) をリリースしている (図2参照)。従来、マルチビームソナーの性能 評価はビームの太さに目が行きがちであったが、 ビームの太さはソナーサイズに依存する部分が



	SeaBat T20-P	SeaBat T50-P
周波数	190~420kHz	
分解能	0.6cm(深度方向)	
ビーム幅	$1.0 \times 1.0^{\circ}$ (400kHz)	$0.5 \times 1.0^{\circ}$ (400kHz)
(横×縦)	2.0×2.0° (200kHz)	$1.0 \times 2.0^{\circ}$ (200kHz)
ビーム数	10~512 (任意に設定可)	
スワス幅	140°/165°(等間隔/等角度)	150°/165°(等間隔/等角度)
直下最大	550m (200kHz)	475m (200kHz)
レンジ	575m (200kHz:X-range 機能使用時)	
発信間隔	50Hz	
測深方式	クロスファンビーム方	式(ビームフォーミング)
船上局	$131 \times 424 \times 379$	mm(H \times W \times D)
サイ 送波器	86.6×93.1×280.1mm(H×W×D)	
く 受波器	$123{ imes}254{ imes}102{ m mm}$	$90.7 \times 460 \times 102 \mathrm{mm}$
重 船上局	14kg(空中)	
量送波器	5.4kg/3.4kg (空中/水中)	
受波器	5.0kg/4.2kg (空中/水中)	8.2kg/3.9kg(空中/水中)

図2 Teledyne RESON SeaBat 最新機種

大きいため、可搬性を重視すると限界がある。 一方、測深精度および構造物の輪郭を捉える性 能は、S/N比、ビーム密度、検出アルゴリズム などにも大きく依存するため、SeaBat T シリー ズではこれらを大幅に改善した受波アレイと処 理プロセッサーを新規開発し、実用上の性能 向上を果たした。

一方、基本性能が向上してきたことを受け て、ビームの太さはある程度犠牲にしつつも、 高い測深性能と可搬性を備えた低価格な機種 も登場してきた。旧RESON社が2013年、 Teledyne Marineグループと経営統合して以 降、コンパクトで低価格なマルチビームの製造 販売にも関わっている。この様な背景で開発さ れたのが、Teledyne ODOMブランドのMBシ リーズ (MB1, MB2)である (図3参照)。

著者らは小型軽量で高精度なマルチビームソ ナー MB1 に着目し、これを活用して洪水時の 河床形状を面的に計測するためのシステムを構 築した。国内外において、マルチビームによる 洪水時の面的な計測を、実河川に適用可能な

MB1 ソ	ナー MB2 ソナ	ー 船上局
	MB1	MB2
周波数	$170{\sim}220 \mathrm{kHz}$	$200{\sim}460 \mathrm{kHz}$
分解能	3.6cm(深度方向)	2.0cm(深度方向)
ビーム幅	3.0(縦)×4.0°(横)	$1.8{ imes}1.8^{\circ}$
ビーム数	10~512(任意に設定可)	10~256(任意に設定可)
スワス幅	10~120° (任意に設定可)	10~140° (任意に設定可)
直下最大 レンジ	240m	200m
発信間隔	60Hz	
測深方式	クロスファンビーム方式(ビームフォーミング)	
船上局	$286.0 \times 305.0 \times 133.0$ mm	$286.0 \times 260.0 \times 140.0$ mm
	(L×W×H)	$(L \times W \times H)$
イズソナー	267.0 imes 152.0 imes 146.0mm	$267.0 \times 152.0 \times 206.0$ mm
	$(L \times W \times H)$	$(L \times W \times H)$
重 船上局	5.8kg(空中)	5.5kg(空中)
堂 ソナー	10.2kg/4.3kg (空中/水中)	11.3kg/4.9kg (空中/水中)

図3 Teledyne ODOM MB シリーズ

方式で実施した事例については、おそらく前例 を見ることが出来ないであろう。

この様に低価格でスペックに劣る機種であっ ても、そのコンパクト性を活かして、従来機種 では不可能であった計測方法を実現している点 に本研究の新規性があり、マルチビームソナー の新たな活用方法の1つを提案するものである。

3. 実験方法

3.1 実験概要

計測実験は、平成27年6月25日および7月 6日の2回、十勝川千代田実験水路にて実施し た。当実験所は、帯広開発建設部によって運 用されている国内最大規模の実物大河川実験 施設である。大規模出水時の水理現象や破堤 現象を研究するため、様々なセンサーや計測器 が投入されて大規模な実験が実施されている。 著者らはその一環として参加しており、洪水時 の河床変動と流速や水面波形などの関係性を 把握し、また掃流砂量の推定に関する理論を 深めることを目的として観測を行った。

著者らの研究目的は河床波を面的に把握する ことが大前提となるため、小型マルチビームソ ナー(MBI)とADCPによる同時観測を行った。 計測方法は、MB1とADCPを、洪水流量観 測用の無人ボートに装着し、水路縦断方向に 30mの区間を移動させながら、約2~3分間隔 で2時間にわたり連続的に計測を行った。観測 イメージを図4に示す。





3.2 無人ボート搭載型マルチビームソナーの概要

(1) 無人ボート(トリマラン型)

ADCPによる洪水流量観測の際には橋上操 作艇と呼ばれる無人ボートが用いられる。この ボートを利用して、ADCPと MB1を同時に計 測出来るように改造し、本観測に用いた。橋上 操作艇は耐用流速に応じて数タイプが考案され ているが、本実験では、ペイロードを確保する ために、土木研究所が所有している最も大型な 全長3mのトリマラン型ボート(本来の耐用流 速 7.0m/s)を選定し、船尾に浮力を追加して 用いた(図5参照)。

(2) マルチビームソナー MB1

マルチビームソナーは、Teledyne ODOMの MB1を用いた(図3参照)。本機はビーム幅3× 4°と国内で普及している機種に比べて見劣りす るが、軽量コンパクトで高精度なため、海外で は主に河川や浅場で用いられている。センサー のサイズは A4 ノート程度で水中重量は 4.3kg と、かろうじて橋上操作艇に搭載できるサイズ である。モーションセンサーは Teledyne TSS の DMS-05 を、データ記録ソフトは Teledyne PDS の PDS を用いた。尚、上位機種の MB2 で は、POS MV WaveMaster もしくは POS MV SurfMaster の IMU をセンサーに内蔵でき、か つ GNSS を船上局に内蔵できるため、より軽量 コンパクトな構成となっている。

(3) ADCP

河床形状変化と流速分布の関係を把握する ために、Teledyne RDInstruments 製リバープ ロADCP1200kHz(鉛直ビームは 600kHz)を 用いて、流向流速の縦断分布を計測した。機 器仕様を図6に示す。ADCPとは超音波のドッ プラー効果を応用した多層流向流速プロファイ ラーである。河川においては流量観測や流況を 計測する計測機として利用されているが、ボト ムトラック機能により横断測量に利用することも 可能である。但し、垂直方向から 20 度の傾斜



図5 観測ボートの概要

RiverProADCP



周波数	傾ビーム 1200kHz
	鉛直ビーム 600kHz
測定距離	$0.12\mathrm{m}{\sim}25\mathrm{m}$
層厚	$2 \mathrm{cm} \sim 5 \mathrm{m}$
層数	15~30 層(最大 200 層)
測流範囲	最大±20m/s
流速精度	$\pm 0.25\%$ または $\pm 2 \mathrm{mm/sec}$
観測項目	流速(3 軸成分)、水温、機器方位
材質	強化プラスチック
高さ	193.4mm
直径	165.1mm
空中重量	4.35kg

図6 ADCPの仕様

角で放射状に4本のビームを発射するため、河 床波の測深データとしては空間解像度に劣ると 考え、本研究では測深データに関してはマルチ ビームの計測結果を利用することとした。

(4) 無線通信装置

MB1 および ADCP のデータをリアルタイム に陸上へ無線伝送する必要があるため、無人 ボートに無線通信装置を2基搭載し、MB1と ADCP それぞれのデータをリアルタイムに陸上 局へデータ転送させた。無線装置の性能として は通信距離 800m 以上のスペックを有している が、マルチビームに関してはデータ容量が非常 に大きいため、実際には通信距離 130m 程度 が限界であった。

(5) RTK-GNSS コンパス

マルチビームの測位システムとして、 Hemisphere 社の RTK-GNSS コンパス VS330 を用いた。また、移動床においては ADCP の ボトムトラックが流砂を捉えてしまうことにより トラッキング誤差が大きくなるため、移動観測 のリファレンスとして JAVAD 社の RTK-GNSS (Delta)を用いた。尚、マルチビームと ADCP の測位システムは信号分岐ケーブルを製作する ことで一元化が可能となるが、今回はバックアッ プのために RTK-GNSS を2台搭載して観測を 行った。

3.3 観測方法

各実験ケースはおよそ6時間程度かけて実施 しており、縦断方向30mほどの区間を上下流 方向に移動させながら、1ケースにつき2~3分 ピッチで、50~70回の計測を行った。なお、 本実験設備では水路を横断する構造物が仮設 足場で強度に不安があるため、上下の曳航は測 岸から重機を用いて行った。

観測データは無線で陸上局まで伝送させ、リ アルタイムにデータを確認しながら観測を行って いる。実験状況を図7に示す。

4. 観測結果

4.1 河床波の形状

本報では2回の実験のうち、最大流速が大き かった6月25日の結果について報告する。実 験開始から約90分後に水位と流速がピークに 達し、ピーク時の流速は3.6m/s、縦断平均水 位は2.6mであった。実験中の水位を図8に示 す。観測は、水深が1.2mを越えた時点で開始 し、水深が1.7mを切った時点で終了しており、 トータルの観測時間は約4時間に及ぶ。

MB1による河床波連続計測結果を図9に 示す。水位の上昇期(No.03~14)において は、河床波の形状が安定せず、砂連状の形態 を示している。水位がピークに達した No.15 付 近から河床波は横断方向に直線的な形状とな り、砂連(Ripple)から砂堆(Dune)へと遷 移した様子が確認できる。No.15 以降の河床 波は、比較的安定した形状を維持したまま一 定速度で下流方向へ移動しており、水位が低 下するまでこの傾向は続く。No.38 付近を見る と、小さなコブが誕生しており、それが成長し

十勝川千代田実験水路 実験区画



図7 河床波計測の実験状況





図9 マルチビームによる河床波連続計測結果

ながら下流側の河床波と合体する様子が見られ た(No.43)。また、観測開始時は平坦河床から スタートしており、実験中は顕著な河床波が見 られるものの、観測終了時は再び平坦河床に 戻っていた。このことは、洪水前後での横断測 量結果に大きな変化が見られない場合でも、洪 水中には河床の状態が大きく変化している場合 があることを示唆するものであり、著者等の経 験でもこの様なケースは多い。

次に、河床波の縦断形状を図 10 に示した。 縦断データは、マルチビーム測量の結果から 中央付近の測線を切り出して比較した。実験 中、最も河床波が大きくなったのは No.32 から No.38 付近であり、水位がピークに達してから 60 分ほど経過している。

No.32 の河床波 (Dune) は、波長が 11 m、 波高が 0.65 mであった。Dune の形成規模は 水深依存とされており、平均波長が水深の約5



倍程度、波高は水深の10~50%と報告されて いる⁴⁾。

本実験では波長が平均水深の約4倍前後、 波高は25%前後であり、概ね理論値と一致して いるが、波高が水深の10~50%という定義は 幅が広い印象があり、実際には流速など他の 要因も影響しているのでは無いかと考えられる。

4.2 河床波の移動速度

図9で示した平面図はおよそ2~3分間隔で 計測した結果であり、途中に数分間の中断など もあるため、これを時系列比較するために、縦 軸に観測経過時間、横軸に縦断距離をプロット し、河床波の時空間変化図を作成し、図11に 示した。経過時間が50分を越えた辺りから斜 め下に明確なスジ模様が見られる。この傾きか ら河床波の移動速度を試算した結果、前半の 4ケース(実線)では0.66m/分、それ以降(点線) は若干速度が低下し、0.57m/分となった。河 床波の移動速度が低下し始めた時間帯は、図 10に示す河床波が最も発達した時間帯と一致 する。この時の水位と流速に大きな変化は見ら れないことから、河床波が大きくなることでそ の移動速度が低減することを示唆している。

4.3 河床波と流速分布の関係

次に、河床波と流速分布、および流砂速度 について検証した。図12に、マルチビームに よる平面コンタ図と ADCP による縦断流速分 布図を示した。ADCP の流速値はGNSSリファ レンスで計算した流向流速から流下方向成分を 抽出している。なお、ADCP では河床付近に 不感帯が生じるため、対数則法で外挿補完した⁵⁾。

ADCP の流速を見ると、水面付近では 3.4 ~3.6m/s 程度で縦断方向に比較的均一である が、河床付近は流速変化が顕著で、河床波の 山の部分では底面付近で 2.0m/s 程度、谷の 部分では底面付近で 0.5m/s 程度の流速であっ た。また、流速 2.5m/sを境界としたコンタライ ンをプロットすると(黒線)、赤線で模式したよ うに河床波と逆位相となる傾向を示した。これ は、河床波の山頂部を越えた部分で剥離流が 生じ、河床波の窪みの部分で渦が形成される 事による副次的な境界面を表していると考えら れる⁶⁾。

次に、ADCP で得られた流速の鉛直プロファ イルを縦断方向に配置し、河床波の縦断位置 における違いを検証した (図 13 参照)。

河床波の谷の部分では流速鉛直プロファイ ルは対数則に則った大きなカーブを描き、河床 位付近では流速は20~30cm /sと小さくなる。 河床波の山頂部付近になると流速鉛直プロファ





図13 河床波と流速鉛直プロファイルの関係

イルは直立傾向を示し、河床位付近の流速は 200 cm /s 以上と大きい。これが山頂部を越え ると再び大きなカーブを描き、底面付近の流速 は非常に小さくなる。この現象は、谷の部分で は剥離流による渦が形成されることで説明でき る。また、山頂部では十分に大きな掃流力を持っ ていることが示唆されるため、次に、ADCPに よって計測された流砂速度の縦断分布との関係 について検証した。

ADCP 観測ではボトムトラック機能と VRS-RTK-GNSS を組み合わせることにより、砂の 移動速度(流砂速度)を検出することが出来る ため⁷⁾、これを利用して縦断方向の流砂速度分 布を求めた(図 14 参照)。

その結果、河床波のトップ付近では流砂速度 が100~120cm /s 程度であった。また、河床波 の谷部分では流砂速度が小さく、5~20cm /s 程度であった。縦断方向の平均値を計算すると 53~56cm /s となり、表面流速と比べると14~ 15%程度であり、著者等が洪水観測の際に得た 経験値にほぼ一致している。

河床波の移動は砂のサルテーション(躍動) が関与しているとされており、上流側斜面から トップ付近は速い流速にさらされるために砂粒 子が飛散し、流速の遅くなる谷部分に溜まりな がら全体が下流側へ移動していくというモデル が知られており⁸⁾、本観測でもこうした理論を裏 付ける結果が得られた。

4.4 河床波と水面波形の関係

マルチビーム測量に用いた RTK-GNSS コン パスの標高データを利用し、水面の縦断波形と 河床波の関係を検証した。図 14 は河床波と水 面波形をプロットしたもので、水面波形は縦断 方向に5データ(およそ1m)の平均処理を行っ ており、河床波と比較しやすい様に縦方向に3 倍拡大している。

図15を見ると、いずれのケースも水面波形



と河床波はほぼ逆位相の関係であることが分 かる。これは水槽実験などでも確認されている ことであり、理論通りの結果であるものの、実 河川規模の洪水観測において水面波形と河床 波形との関係を示した実測データはほとんど無



く、貴重な結果と言える。次に、水面波形の移 動速度と、河床波の移動速度を比較した。水 面波形の時空間変化をプロットし、斜め方向に 生じるスジの傾きと位相を図 11 で示した河床波 の時空間変化図と比較したところ、両者は完全 に一致した (図 16 参照)。このことは、水面波 形と河床波の移動速度は等しく、かつほぼ同じ 位相で下流側に移動していることを示している。 洪水時に河床形状を計測するのは大変な困難 を伴うが、水面の計測は比較的容易であり、非 接触による計測方法などもいくつか存在する。 このため、洪水時に水面波形を計測することが できれば、河床波の波長と移動速度が推定で きる可能性がある。また水面波の計測は必ずし も縦断方向に計測する必要は無く、水位の定点 観測によって水面波の波長と周期を計測するは 可能と考えられる。

4.5 河床波と流速補正係数の関係

次に、河床波と流速補正係数の関係を検証 した(図17参照)。流速補正係数とは、表面 流速を計測した値を元に、鉛直平均流速を算 出するための換算係数であり、国内では一般 的に0.85が使われている。流速補正係数(緑 線)は縦断方向に変化が大きく、1.0(緑の直線)



を越えるケースが散見された(図中赤丸囲い)。 流速補正係数が1.0を越える条件を見てみると、 河床波のトップ付近であること、水面波の谷部 にあたること、流砂速度が非常に速いこと、な どが良い再現性をもって出現していることが見 て取れる。流速補正係数が1.0を越えるという ことは、表面流速よりも鉛直平均値の方が大き くなることを意味しており、これは図13で示し た流速鉛直プロファイルが河床波のトップ付近 では直立傾向を示していることと一致している。

なお、流速補正係数を縦断方向に平均する と、0.86から0.88の範囲となり、これは国内 で経験的に知られている範囲(0.85~0.9)と 一致している。

5. まとめ

小規模河床波は流れの抵抗を生じさせ、河 川水位の上昇要因となるため、その実態を把握 することは河川管理のうえで重要な課題とされ てきた。しかしその観測には多大な困難が伴う ため、従来は小規模な実験水路や数値解析な どに依らざるを得なかった。近年では測深器に よる定点観測や ADCP による横断観測の事例 が多く見られるようになってきたが、面的に連 続計測した事例はほとんど見られない。そこで 本研究では、洪水観測用の橋上操作艇を改良 してマルチビームと ADCP の同時観測システム を開発し、実河川スケールの河床波現象の観 測に成功した。観測の結果、河床波の形状、 サイズ、移動速度が詳細に計測できたことに加 え、河床波の挙動を支配する流速や流砂速度、 水面波形など様々な水理データとの関連性につ いても貴重なデータを得ることが出来た。この 観測技術は、河川工学分野の研究に大きな進 展をもたらすものと期待できる。

また、この様な観測には軽量コンパクトなマ ルチビームが不可欠である。Teledyne ODOM の MB1 はビーム幅が広い(3×4°)ものの、 水深が浅ければ十分な精度を確保できるうえ、 無人ボートに搭載して無線でデータ転送できる というメリットもある。また、後継機種としてビー ム幅 1.8×1.8°の MB2も開発されており、今 後河川分野での活用が大いに期待できる。

6. 謝辞

本研究成果は、帯広開発建設部による「平 成27年度千代田実験水路現地実験」による 成果の一部である。橋上操作艇の改造に際し ては、(株)水文環境の井上氏に協力を頂いた。 各機関の関係者の皆様に、感謝の意を表す。

■参考文献

- 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状 研究小委員会:移動床流れにおける河床 形態と粗度、土木学会論文報告集 第210 号・1973年2月
- 2) 芦田和男、澤井健二:河床波の変形過程 における実験的研究、京大防災研年報、 第23号 B-2.1980.
- 3)福岡捷二、奥津一夫、山坂昌成:急勾配 移動床流れにおける河床波の形状、伝播 特性:土木学会論文報告集、第323号・ 1982年7月
- 泉典洋、中里遙介、活発な浮遊砂輸送 を伴う小規模河床波:北海道大学大学院 工学研究科 http://www.ric.or.jp/profile/ works/kiyou/h2101.pdf
- 5)中川博次、辻本哲郎、村上正吾、水橋 雄太郎:河床波状の流砂量分布について、 土木学会第28回水理講演会論文集1984 年2月
- 高矢敦啓、岡田将治、江島敬三、菅野裕 也、深見和彦: ADCPを用いた摩擦速度 と掃流砂量の算定手法、水工学論文集第 54巻2010年2月
- 7) 岡田将治、竹内慈永、和泉征良、萬矢敦啓、 橘田隆史: ADCPとRTK-GPS搭載橋上 操作艇を用いた定点・曳航観測から得られ た水深平均流速、摩擦速度および掃流砂 速度の考察、土木学会河川技術論文集第 19巻 2013年6月

 8) 三輪浩、大同淳之:河床波前縁部での流 砂の挙動に関する検討、土木学会関西支 部年次学術講演会平成元年

■執筆者‐

橘田 隆史 (きつだ たかし) 株式会社ハイドロシステム開発 大阪本社 Teledyne Marine グループの



ADCP やマルチビーム国内販売代理店 t-kitsuda@hydro-sys.com

(共著者)

坂元 賢司 (さかもとけんじ)
株式会社ハイドロシステム開発 大阪本社
ke-sakamoto@hydro-sys.com
佐々木 智弘 (ささき ともひろ)
株式会社ハイドロシステム開発 東京支店
t-sasaki@hydro-sys.com
萬矢 敦啓 (よろずや あつひろ)
国立研究開発法人 土木研究所
水工研究グループ 水文チーム
yorozuya@pwri.go.jp
小関 博司 (こせき ひろし)
国立研究開発法人 土木研究所
水災害・リスクマネジメント国際センター
h-koseki@pwri.go.jp